第46卷 第6期
2023年6月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 6
Jun. 2023

基于PML-V2数据集的中国蒸散发时空动态特征分析

魏 涛， 王云权

（中国地质大学（武汉）环境学院，湖北 武汉 430074）

摘 要： 陆地蒸散发是陆-气水热交换的重要过程，是全球水分运移及能量转换中重要的一环。识别蒸散发的时空动态特征对研究区域水循环和能量转换具有重要意义。此次研究利用9个通量站观测数据，对比分析了3种全球蒸散发产品（GLEAM、MOD16以及PML-V2）在中国区域的适用性。在此基础上，选取在中国区域适宜性最佳的地表蒸散发产品数据，对2003—2020年中国地表蒸散发时空动态特征进行了分析。结果表明：（1）PML-V2蒸散发产品在中国区域的适用性最佳。（2）在时间上，中国蒸散发在研究时间段呈增长趋势；空间上，研究时间段由西北到东南总体呈增加趋势。（3）基于Hurst指数分析的未来中国蒸散发变化状况，预期将与过去表现相反趋势，即过去总体呈增长趋势，未来蒸散发会下降。此次研究通过对中国地表蒸散发时空动态特征进行分析，以期为区域水资源利用及优化配置提供参考借鉴。

关 键 词： 蒸散发；适宜性；动态特征；中国

文章编号： 1000－6060(2023)06－0857－11(0857～0867)

蒸散发的研究对于水资源的合理配置、农作物的增产增量以及区域气候的动态分析意义重大[1]。目前对于蒸散发的直接测量一般是集中在小尺度范围，测量方法有蒸渗仪、波文比、涡度相关等，对于大区域尺度的蒸散发一般无法通过实际测得[2]。随着遥感技术和经验理论模型的发展，使得大区域尺度的实际蒸散发估算成为了可能。目前全球尺度与区域拟合效果较好的产品主要有基于PM（Penman-Monteith）公式的MOD16[3]、PML-V2[4]和基于PT（Priestley-Taylor）公式的GLEAM[5]蒸散发产品。

蒸散发的物理机制受多种气候环境等地表参量的影响，通过对蒸散发在全国时空动态特征的分析，能够从宏观角度对全国地域气候蒸散情况和未来蒸散发的变化情况作直观的了解，为干旱预警、水资源调度提供数据来源和分析依据。2011年刘昌明等[6]利用优化后的PM公式计算了中国的潜在蒸散发，并分析了相关气象环境因子对蒸散发变化趋势的影响；张巧凤等[7]基于MODIS蒸散发数据对锡林郭勒草原近14 a的蒸散发时空动态作分析，发现锡林郭勒草原蒸散发总体表现为由东北部和东南延线向西南部递减且空间变异比较稳定；邓兴耀等[8]利用MODIS蒸散发数据集对天山山区2000年到2014年蒸散发作了时空动态特征分析，发现蒸散发在空间上有西部大东部小、北部大南部小，且近15 a全区蒸散发变异程度不明显；郑德凤等[9]利用河北省12个气象站的实际气象观测资料，采用PM公式计算了河北省1967—2019年的潜在蒸散量，分析发现研究时段内蒸散发存在明显的地带性特征，其总体呈上升趋势。对于蒸散发的时空动态分析，大多数学者主要集中在区域性尺度的蒸散发分析，或通过改进PM公式计算的潜在蒸散发进行分析，或选取蒸散发产品分析时没有考虑到蒸散发产品在区域的适宜性。本文通过全球通量站网发布的FLUXNET2015数据集中中国的9个通量站数据[10]，

收稿日期： 2022-09-22； **修订日期：** 2022-10-02
基金项目： 国家自然科学基金项目(42071045)资助
作者简介： 魏涛(1993-)，男，硕士研究生，主要从事陆-气水分交换研究. E-mail: wt@cug.edu.cn
通讯作者： 王云权(1987-)，男，副教授，主要从事土壤水分运移研究. E-mail: wangyq@cug.edu.cn

对上述3种蒸散发产品在中国区域的适用性进行了评价。在此基础上，利用效果最优的蒸散发产品对中国蒸散发的时空动态特征进行了分析，为中国的水资源规划及生态水文研究提供参考及借鉴意义。

1 研究区概况

中国地处亚洲东南部，总体地势西高东低，气候类型多种多样。根据中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心气候区划数据，以日平均气温不低于10 ℃稳定期的积温和最冷月气温或极端最低气温多年平均值为热量指标，以干燥度（见气候指数）为水分指标将研究区划分为10个一级气候区进行分区讨论[11]（图1），其中琼南西沙区和南沙区各岛屿分别属于中热带（VIII）和南热带（IX），岛屿面积较小且分散，对于总体研究意义不大，故本次研究不对2个区域的蒸散发作探讨。

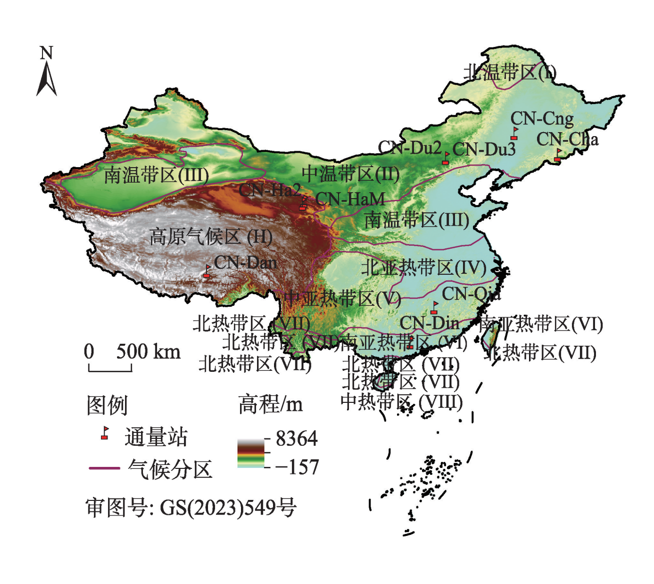


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

2.1.1 通量站数据 由于FLUXNET2015（https://fluxnet.org）数据集的完善性与缺失值或异常值处理方法的先进性，本次研究选取数据集中位于中国区域的9个共享数据站点（剔除了一个误差较大的数据站点），对全球蒸散发产品在中国地区的适宜性进行研究，站点分别是CN-Cha、CN-Cng、CN-Dan、CN-Din、CN-Du2、CN-Du3、CN-Ha2、CN-HaM、CN-Qia，站点分布如图1，站点详细信息如表1。

2.1.2 GLEAM蒸散发产品数据 GLEAM（Global land evaporation amsterdam model）蒸散发产品数据集产品通过卫星遥感数据估算0.25°分辨率每天的实际地表蒸散发和植物根系土壤水含量。该数据集算法由Miralles于2011年首次发布[12]，2014年改进为GLEAM（v2）[13]，2017修订发展为最新的GLEAM（v3）系列产品。GLEAM（v3）在保持水分通量与之前版本大致一致的情况下改进了与91个通量站点和2325个土壤水分传感器各层土壤水分含量的相关系数。数据下载网址www.GLEAM.eu。为了对产品进行中国区域适宜性分析，本次研究根据通量站数据及产品数据时间范围下载了2002年1月—2010年12月GLEAM（v3）每月的蒸散发数据。

2.1.3 MOD16数据 MOD16数据集是由美国国家航空局通过Aqua和Terra卫星平台数据通过MOD16算法生产的全球地表蒸散发产品数据集，该数据集产品包含空间尺度500 m和时间尺度8 d的地表蒸散发，覆盖面积为全球1.09×10^{8} km^2的陆地，

表1 通量站点基本信息

Tab. 1 Basic information of flux site

站点ID	站点名	经度/(°)	纬度/(°)	土地覆盖类型	年份
CN-Cha	长白山	128.0958	42.4025	混生林	2003—2005
CN-Cng	长岭	123.5092	44.5934	草地	2007—2010
CN-Dan	当雄	91.0664	30.4978	草地	2004—2005
CN-Din	鼎湖山	112.5361	23.1733	常绿阔叶林	2003—2005
CN-Du2	多伦草地	116.2836	42.0467	草地	2006—2008
CN-Du3	多伦退化草甸	116.2809	42.0551	草地	2009—2010
CN-Ha2	海北灌丛	101.3269	37.6086	湿地	2003—2005
CN-HaM	西藏海北高山站	101.1800	37.3700	草地	2002—2004
CN-Qia	千烟洲	115.0581	26.7414	常绿针叶林	2003—2005

涵盖了各种植被类型，该数据集的有效数据日期为2000年1月至今[14]。MOD16算法基于PM公式计算的蒸散发主要分3部分：土壤蒸散发、湿润的冠层蒸散发和植物干冠层表面的蒸腾，通过计算各部分蒸散量的基础上分别计算白天和夜间蒸散发并整合到天尺度。该产品数据通过AmeriFlux的46个通量站点数据与产品数据集对比显示，改进的算法有效地将平均绝对误差（MAE）由0.39 mm·d^{-1}提高到0.33 mm·d^{-1}。为了对产品进行中国区域适宜性分析，本次研究根据通量站数据及产品数据时间范围下载了2002年1月—2010年12月每8 d的蒸散发数据，并通过取月均值的方法，将时间尺度处理为每月。数据通过GEE（Google Earth Engine）平台下载。

2.1.4 *PML-V2数据* PML-V2数据集是中国科学院地理科学与资源研究所Zhang等[4]2019年利用谷歌地球引擎GEE平台，以遥感数据为驱动，基于Penman-Monteith-Leuning蒸散发模型计算的全球地表蒸散发数据，该数据集的空间分辨率为500 m，时间分辨率为8 d[4]。该数据集通过全球91个广泛分布的通量站点（涵盖了10种植被类型）数据验证，产品数据集的蒸散发均方根差和偏差有效的减小到0.69 mm·d^{-1}和−1.8%。PML-V2数据集时间范围为2002年7月—2020年12月，本次选取该时间段的全部数据，并通过取月均值的方法，获取2002年7月—2020年12月的月尺度数据，用以适应性分析对比。

2.1.5 *其他参考数据* 中国区域的DEM高程数据为美国国家航空航天局喷气推进实验室SRTM v3产品[15]，分辨率为30 m，通过GEE平台下载。

2.2 研究方法

2.2.1 *蒸散发产品区域适宜性评价* 为了分析GLEAM、MOD16和PML-V2 3种蒸散发产品在中国区域的适宜性，本研究通过FLUXNET2015数据集中中国区域通量站点的通量站蒸散发数据与3种蒸散发产品的站点蒸散发数据作对比，利用数据拟合的皮尔逊相关系数、均方根差分析3种蒸散发产品在中国的适宜性[16-17]。

（1）皮尔逊相关系数。皮尔逊相关系数广泛用于度量2个变量之间的相关程度，本研究通过对比站点实测数据与蒸散发产品数据的相关性强度作为蒸散发产品在中国区域适宜性的评价指标，计算公式如下：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{1}$$

式中：r为皮尔逊相关系数；x_i、y_i分别为样本值；$\bar{x}$、$\bar{y}$分别为两组数据的均值；n为样本总数。

（2）均方根差。均方根差（RMSE）作为一种常用测量数值之间差异的量度，本研究通过站点观测值与蒸散发产品模型值的RMSE来评价蒸散发产品模拟中国区域蒸散发实际值，计算公式如下：

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{\mathrm{obs},i}-x_{\mathrm{mod},i})^2}{n}} \tag{2}$$

式中：$x_{\mathrm{obs},i}$为第i个观测数据；$x_{\mathrm{mod},i}$为第i个模拟数据。

2.2.2 *时空动态特征分析* 蒸散发时空动态特征分析主要是利用各种分析方法，对蒸散发在时间和空间上的动态变化进行分析及预测，发现其中的规律，为更好规划和进行水资源配置提供参考依据[18-19]，分析方法如下表2[20-26]。

表2　分析方法

Tab. 2　Analytical method

方法	作用
变异系数法	统计变量各组数据的变异程度，统计分析蒸散发在时间序列上的稳定性，变异系数的大小反应了像元各年份数据间的离散程度。
Theil-Sen Median趋势分析	稳健的非参数统计趋势计算方法，趋势值(β)大于0时，表示正增长趋势，小于0则表示下降趋势。
Mann-Kendall检验	非参数的时间序列趋势性检验方法。在给定显著性水平下，当M-K检验值(Z)的绝对值小于临界值时，即接受原假设，趋势不显著；当Z的绝对值大于临界值时，则拒绝原假设，趋势显著。
赫斯特指数	用来衡量时间序列是否有长期记忆的一个指标，赫斯特指数(H)位于0和1之间，当H为0.5时，序列是随机的，即没有自相关性；当H大于0.5时，序列有很强的正相关性，未来趋势与过去趋势一致；当H小于0.5时，序列有很强的负相关性，未来趋势与过去趋势相反。

3 结果与分析

3.1 蒸散发产品适宜性评价

本文9个通量站点蒸散发拟合情况如图2、图3所示：

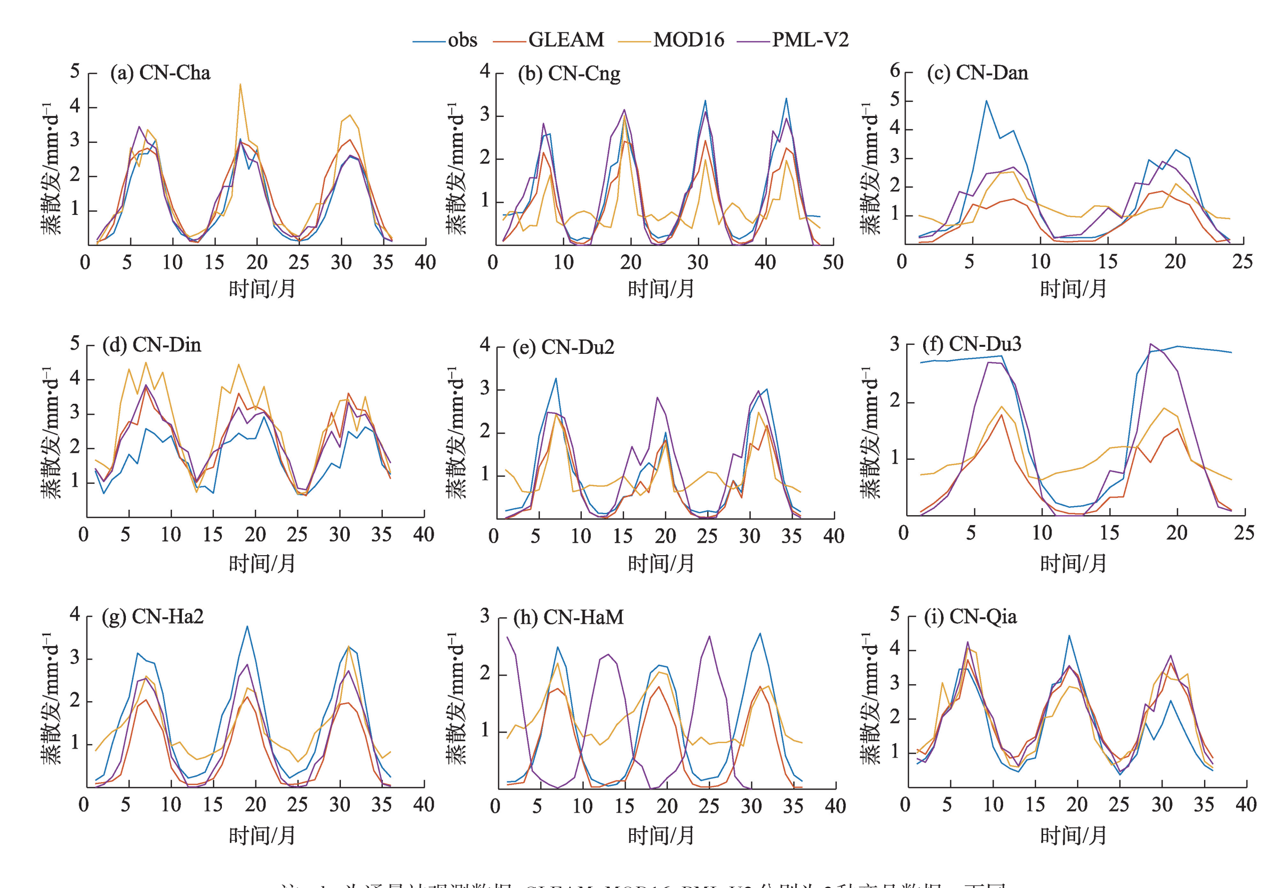
由图2可知，除了CN-Du3站点外，各通量站点数据与GLEAM、MOD16和PML-V2蒸散发产品数据都有较好相关性，蒸散发随时间变化的趋势大体一致。由图3的Taylor图可以观察相关系数、标准差和均方根差3个指标的综合效果，GLEAM与PML-V2与观测值距离较近，PML-V2除CN-Du3站点以外，3个指标均不如CLEAM和MOD16产品。综上，PML-V2各项评价指标相对其他两种产品均表现出一定优势，在时间和空间尺度上与站点蒸散发数据的拟合效果较好，趋势一致，在中国区域有较好的适宜性。因此，对中国区域的蒸散发时空动态特征分析选取了PML-V2产品数据集。

3.2 2003—2020年中国蒸散发空间分布特征

将PML-V2蒸散发产品8 d×500 m分辨率数据汇总计算全国多年平均蒸散发。将多年平均蒸散发分为3级(图4、图5)：低蒸散发区(ET<200 mm·a^{-1})、中蒸散发区(200 mm·a^{-1}≤ET≤400 mm·a^{-1})、高蒸散发区(ET>400 mm·a^{-1})[8]。蒸散发全国分布由西北向南呈逐渐增加趋势，区域内最大值一般出现在水域附近。由变异系数可知，北温带区(I)、中亚热带区(V)、南亚热带区(VI)、北热带区(VII)、中热带区(VIII)空间蒸散发变异程度较低，蒸散发区域变化不大。中温带区(II)、南温带区(III)、北亚热带区(IV)、高原气候区(H)变异程度较大，蒸散发在空间分布相差较大(表3)。贫瘠地区[至少60%的面积为植被不足10%的无植被贫瘠(沙、岩、土)地区]主要分布在中国西北地区，受气候和覆盖类型的共同作用蒸散发较低[27]。在同一纬度地区，不同土地覆盖类型和所处的地理气候类型区蒸散发也有不同程度的差异[28-29]。气候分区图与蒸散发多年均值有较好的一致性趋势。各气候分区内蒸散发的最大值随分区类型由西北像东南逐渐增加。

3.3 2003—2020年中国蒸散发时序变异特征

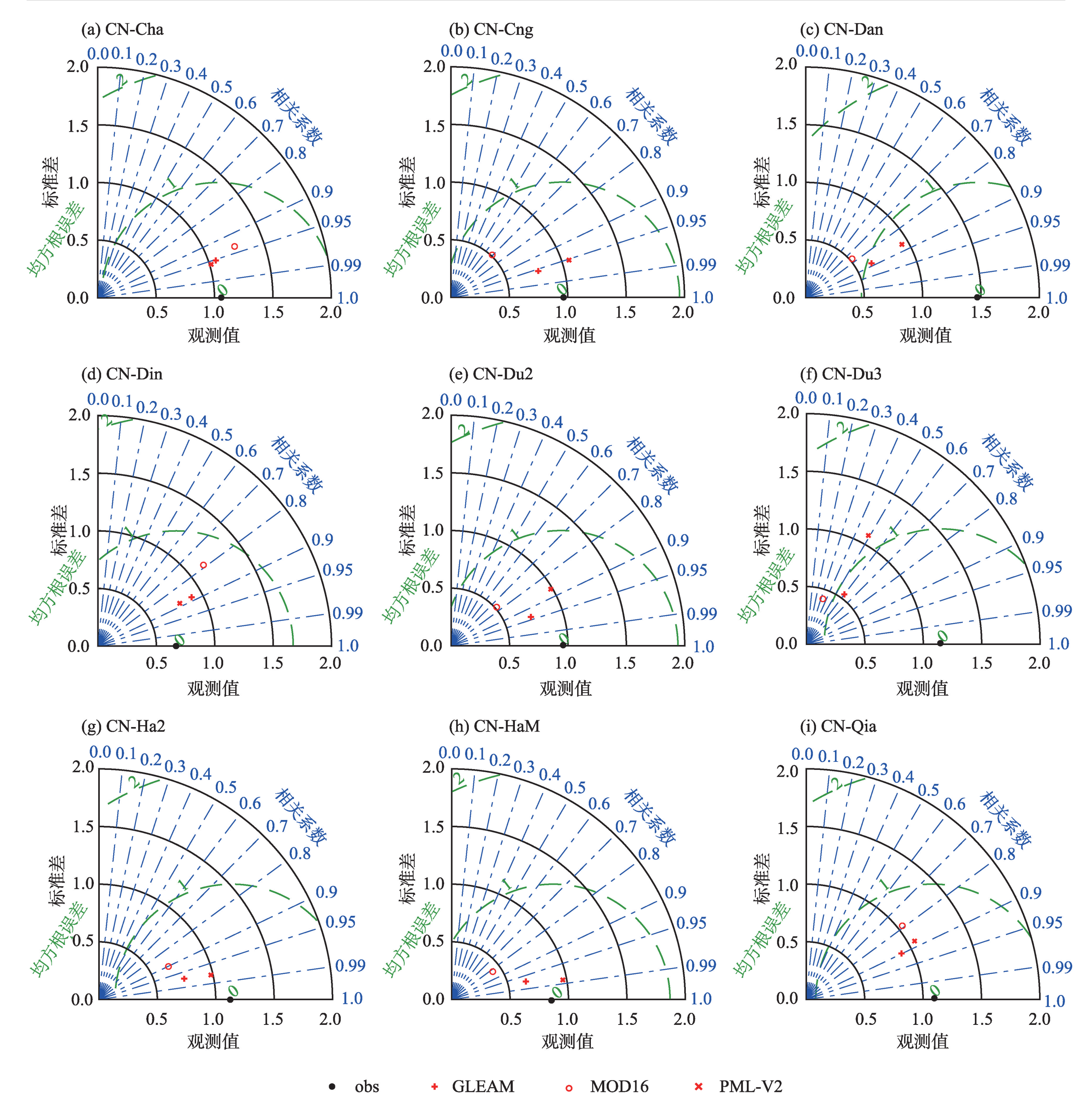
由2003—2020年中国蒸散发时序变异系数空



注：obs为通量站观测数据；GLEAM、MOD16、PML-V2分别为3种产品数据。下同。

图2 站点拟合图

Fig. 2 Diagram of site fitting



注：图中黑点观测点即为obs，其他点位与观测点距离越近即产品效果越好。

图3　站点拟合Taylor图

Fig. 3　Taylor diagram of site fitting

间分布(图6)和变异系数数据统计(表4)可以看出，北温带区(I)、中温带区(II)、南温带区(III)、高原气候区(H)3个区变异系数分别为0.37、0.35、0.38、0.34，在时间序列上的变异相对其他区较大。与上部分空间分析的变异性类似，蒸散发时空变异较大区域主要为中国西北部，在沿海地区城市与较高的时间变异系数相关性较强。变异系数较大区域大多集中在盆地边缘山脉附近，滨海城市亦有较大的变异系数区。

2003—2020年中国全区蒸散发时间上的变化特征如图7所示。并对各区每年平均蒸散发进行一元线性回归，拟合公式为：$ET = B_0 + B_1 \times X$，其中X为年份，B_0为拟合回归常数项，B_1为拟合回归一次项系数，各拟合回归系数如表5。

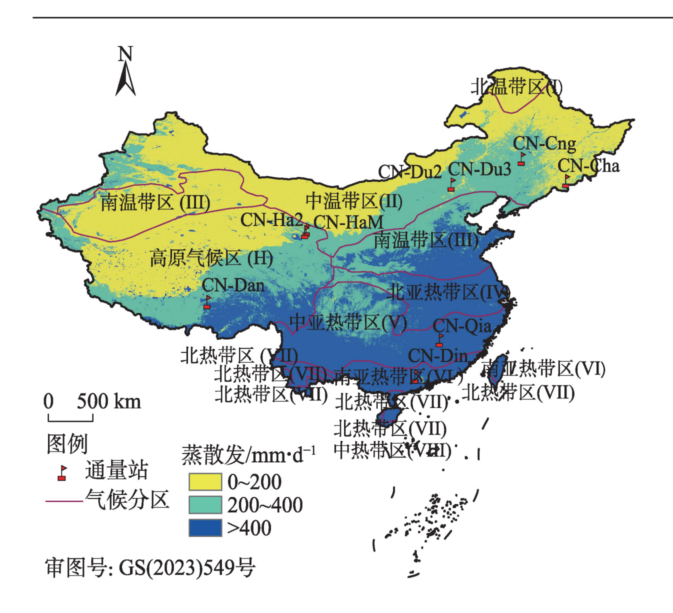


图4 2003—2020年中国平均蒸散发分级

Fig. 4 Average evapotranspiration classification of China from 2003 to 2020

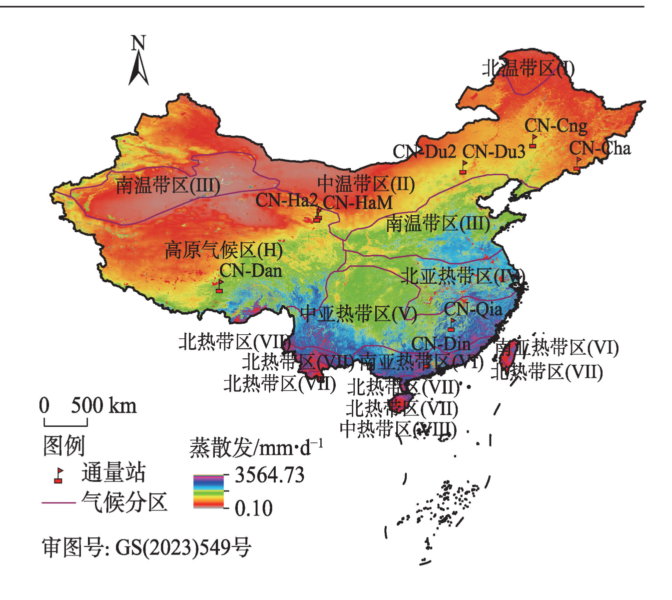


图5 2003—2020年中国多年平均蒸散发空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual mean evapotranspiration in China from 2003 to 2020

从图7可以看出，2003—2020年各区蒸散发有一定的波动。各区蒸散发波动范围与上文空间分析趋势一致，由西北向东南区逐渐增大。

全区蒸散发2003—2020年波动微弱，为增大趋势，变化率为0.89 mm·a^{-1}。为了研究蒸散发在时间上的变化趋势及趋势程度的显著性和可信度，通过Theil-Sen median（T-S）和Mann-Kendall（M-K）分析方法，进一步计算了2003—2020年的趋势斜率（T-S分析系数如图8）和归一化检验统计量（M-K分析Z值如图9）。

对中国各区进行区域统计分析如表6：

Theil-Sen median趋势分析与一元线性回归分析基本一致，全区蒸散发程增长趋势。由M-K分析Z值图和相应的区域统计分析表可知，除了北温带区（I）的置信度水平较高外，其他区域的置信度水平较低，即蒸散发增加或减少在全区的趋势不显著。M-K趋势显著性分析时一般采取双边趋势检验，通常将置信度90%、95%和99%对应Z绝对值1.65、1.96和2.58作为临界值，将显著性划分为：极显著（$|Z|>2.58$）、显著（$1.96<|Z|\leq2.58$）、微显著（$1.65<|Z|\leq1.96$）、不显著（$0<|Z|\leq1.65$）和无变化（$Z=0$）。在中国区域内，2003—2020年蒸散发的增长或下降一般趋势不显著，但是在局部区域内，蒸散发存在明显的增长或下降趋势。

3.4 蒸散发的预测

通过中国区域2003—2020年PML-V2的蒸散发

表3 2003—2020年中国蒸散发统计分析

Tab. 3 Statistical analysis of evapotranspiration in China from 2003 to 2020

分区	面积/10^4 km^2	最小值/mm·a^{-1}	最大值/mm·a^{-1}	均值/mm·a^{-1}	标准差/mm·a^{-1}	变异系数
北温带区（I）	18.73	38.02	716.72	107.47	24.50	0.23
中温带区（II）	303.49	0.20	2205.41	180.85	108.76	0.60
南温带区（III）	162.77	0.10	2466.08	259.15	215.44	0.83
北亚热带区（IV）	56.76	0.20	2283.38	537.27	232.99	0.43
中亚热带区（V）	120.64	0.20	2462.84	522.95	147.82	0.28
南亚热带区（VI）	38.23	0.10	3422.79	719.66	179.79	0.25
北热带区（VII）	7.60	0.20	3434.04	858.29	203.59	0.24
中热带区（VIII）	0.91	1.01	3382.74	990.66	256.40	0.26
高原气候区（H）	251.41	0.10	2288.14	278.22	207.24	0.74

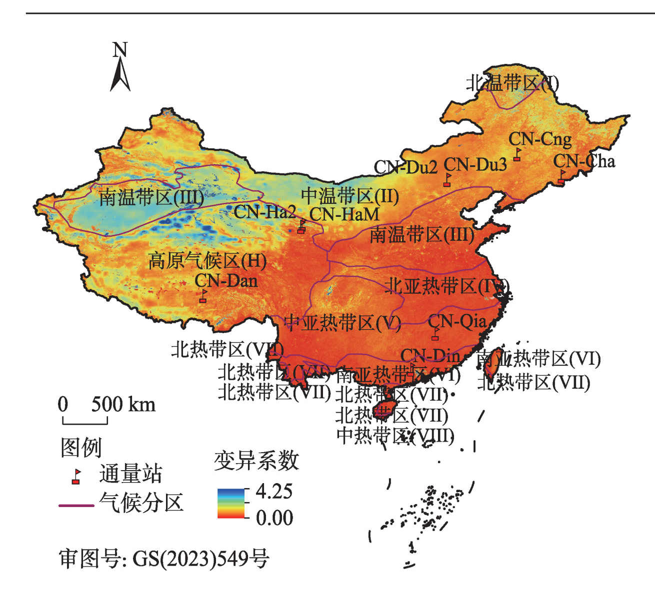


图6　2003—2020年中国蒸散发时序变异系数空间分布

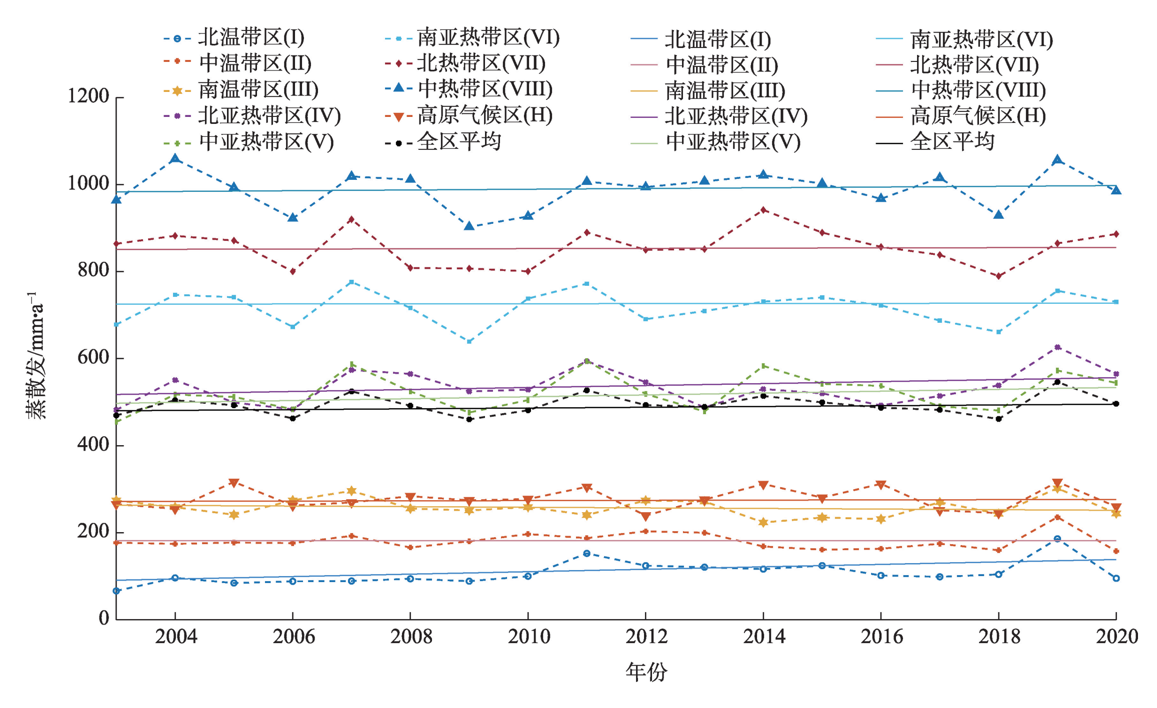
Fig. 6　Spatial distribution of temporal variation coefficients of evapotranspiration in China from 2003 to 2020

表4　2003—2020年中国蒸散发时序变异系数统计分析

Tab. 4　Statistical analysis of temporal variation coefficients of evapotranspiration in China from 2003 to 2020

分区	面积/10^4 km^2	最小值	最大值	均值	标准差
北温带区(I)	18.73	0.09	1.28	0.37	0.16
中温带区(II)	303.49	0.03	4.24	0.35	0.15
南温带区(III)	162.77	0.03	4.24	0.38	0.35
北亚热带区(IV)	56.76	0.00	4.24	0.13	0.06
中亚热带区(V)	120.64	0.00	4.24	0.16	0.08
南亚热带区(VI)	38.23	0.00	4.24	0.13	0.11
北热带区(VII)	7.60	0.03	4.24	0.11	0.07
中热带区(VIII)	0.91	0.03	4.24	0.09	0.21
高原气候区(H)	251.41	0.03	4.24	0.34	0.22

数据计算中国区域的赫斯特指数(图10),对中国区域赫斯特指数进行统计分析有:北温带区(I)赫斯特指数略微大于0.5,即区域未来蒸散发与过去趋势一致,呈略微增长趋势。南温带区(III)赫斯特指数为0.44,未来蒸散发与过去呈相反趋势,即略微增长。北亚热带区(IV)、中亚热带区(V)、北热带区(VII)、中热带区(VIII)、高原气候区(H)赫斯特指数均小于0.5,未来蒸散发与过去呈相反趋势,预测未来蒸散发可能会减小。中温带区(II)和中亚热带区(V)由于两种方法趋势性分析结果不一致,趋势变化率较小,且置信度水平较低,未来趋势可能在稳定水平波动。中国总体赫斯特指数小于0.5,即未来趋势与过去相反。由上文,蒸散发的时间变化特征可知中国蒸散发为增长趋势,未来蒸散发即可能与过去增长相反,逐渐减小。



注:虚线为实际折线图;实线为拟合线。

图7　年均蒸散发时间变化图

Fig. 7　Diagram of annual evapotranspiration changing

表5 拟合回归系数

Tab. 5 Fit regression coefficient

分区	面积/10^4 km^2	B_0	B_1
北温带区(I)	18.73	−5517.40	2.80
中温带区(II)	303.49	161.74	0.01
南温带区(III)	162.77	1645.51	−0.69
北亚热带区(IV)	56.76	−4028.99	2.27
中亚热带区(V)	120.64	−3788.96	2.14
南亚热带区(VI)	38.23	464.99	0.13
北热带区(VII)	7.60	310.23	0.27
中热带区(VIII)	0.91	−699.10	0.84
高原气候区(H)	251.14	−268.73	0.27
全区	961.63	−1302.30	0.89

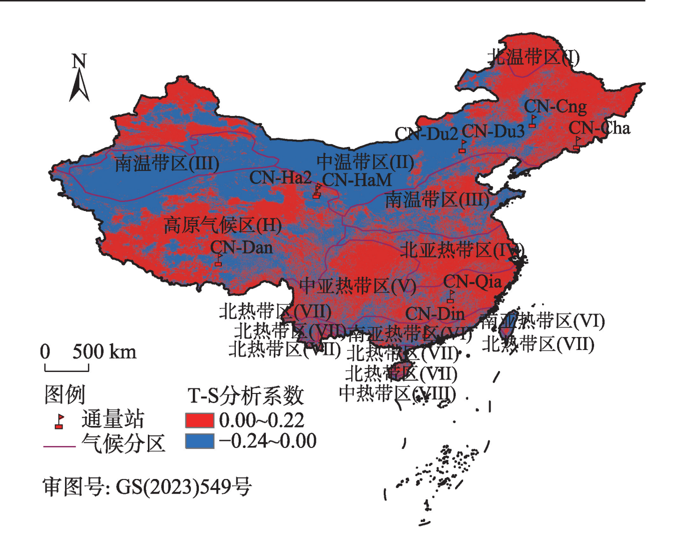
注:B_0为拟合回归常数项;B_1为拟合回归一次项系数。

表6 中国不同分区T-S分析系数和M-K分析*Z*值统计

Tab. 6 Statistics of T-S analytical index and M-K analytical *Z* value of each zone in China

分区	T-S分析系数	M-K分析*Z*值	双边检验可信度/%
北温带区(I)	0.0055	1.54	87.64
中温带区(II)	−0.0007	−0.03	2.40
南温带区(III)	−0.0020	−0.40	31.82
北亚热带区(IV)	0.0048	0.51	39.00
中亚热带区(V)	0.0054	0.52	39.70
南亚热带区(VI)	−0.0001	−0.02	1.60
北热带区(VII)	0.0003	0.01	0.80
中热带区(VIII)	0.0015	0.11	8.76
高原气候区(H)	0.0003	−0.02	1.60

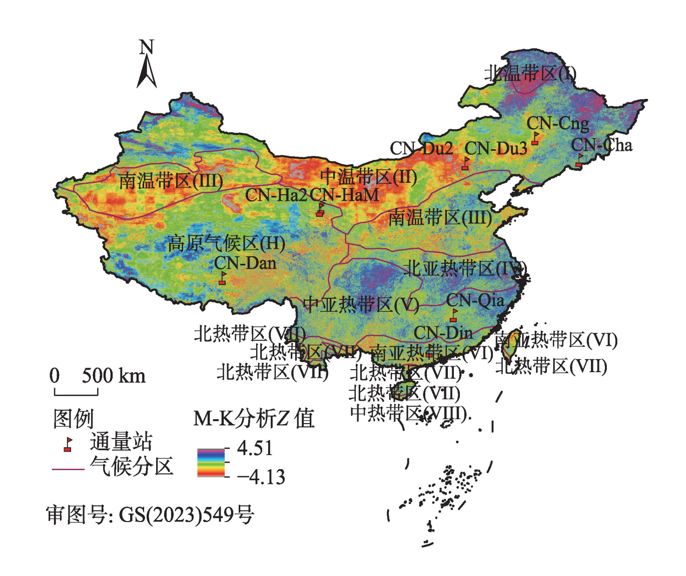
注:T-S分析系数为Theil-Sen median分析方法计算的趋势斜率;M-K分析*Z*值为Mann-Kendall分析方法计算的归一化检验统计量。



注:T-S分析系数为Theil-Sen median分析方法计算的趋势斜率。

图8 2003—2020年中国T-S分析系数空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of T-S analytical index in China from 2003 to 2020



注:M-K分析*Z*值为Mann-Kendall分析方法计算的归一化检验统计量。

图9 2003—2020年中国M-K分析*Z*值空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of M-K analytical *Z* value in China from 2003 to 2020

4 结 论

(1) 中国多年平均蒸散发由西北向东南逐渐增大,主要受地理气象要素影响。各分区蒸散发中中温带区(II)、南温带区(III)、北亚热带区(IV)和高原气候区(H)空间变异系数较大,主要原因是分区空间上的异质性较高,其他分区变异系数较低且空间地理环境比较稳定。

(2) 对中国蒸散发的时间特征分析显示,在相对缺水干燥的北方地区,时间变异系数一般较大,而南方湿润区相对系数则相对偏低。滨海城市和盆地边缘山脉附近,时间变异系数较大,受不规则的局部气候条件影响较大。同时,各分区内也存在时间变异系数差别较大区域,主要与土地覆盖类型及地理环境有关。各区蒸散发在长时序上呈小范围波动变化,各区年蒸散发最大值与最小值出现时间并不完全一致,但是在相关邻域一般最大值与最小值出现的时间较为相关。

(3) 通过两种方法得出北温带区(I)、北亚热带区(IV)、中亚热带区(V)、北热带区(VII)、中热带区

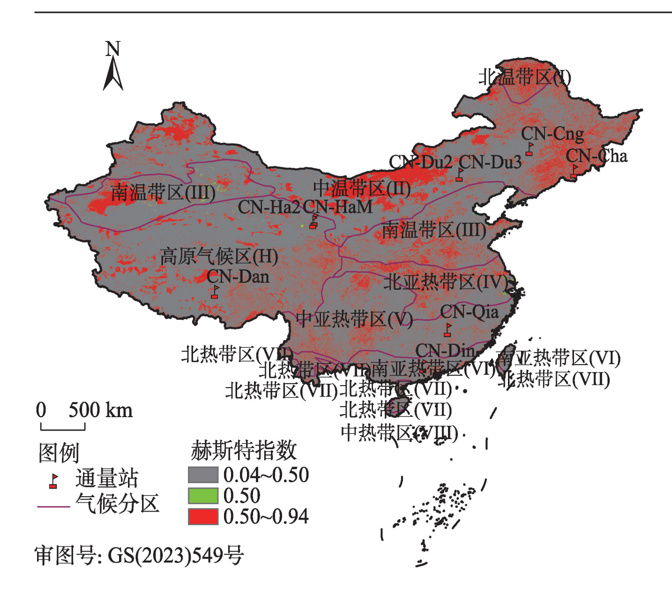


图10 2003—2020年中国赫斯特指数空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of Hurst index in China from 2003 to 2020

(VIII)、高原气候区(H)蒸散发均为增长趋势，南温带区(III)为减小趋势。中温带区(II)和南亚热带区(VI)两种分析方法所得的变化趋势不一致，且置信度水平较低，主要原因可能是两区蒸散发相对稳定，波动较小，增长或减小趋势不明显。结合时间变化趋势和赫斯特指数对未来中国蒸散发进行预测显示，赫斯特指数除了在北温带区(I)大于0.5，即未来的变化状况与过去趋势一致，但赫斯特指数偏小，持续性较小。其他区域赫斯特均值均小于0.5，即未来趋势与过去相反，但值与0.5接近，持续性也不强。本次研究发现，地理气候因素可能是影响大尺度区域蒸散发的主要因素。

(4) 研究尺度的选择对于问题的研究息息相关，为了探究影响蒸散发在时间空间上的不均匀性及影响因子，需要通过不同尺度，不同分析数据进行更深层次的研究。

参考文献(References)

[1] 左大幸, 臧传富, 汪丽娜. 1980—2019年珠江流域潜在蒸发量时空变化及其影响因素分析[J]. 人民珠江, 2022, 43(10): 41-49. [Zuo Daxing, Zang Chuanfu, Wang Li'na. Temporal and spatial variation of potential evaporation and its influencing factors in Pearl River Basin from 1980 to 2019[J]. Pearl River, 2022, 43(10): 41-49.]

[2] 张琨. 遥感蒸散发模型参数敏感性分析与优化方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Zhang Kun. Parameter sensitivity analysis and optimization for remote sensing based evapotranspiration model[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]

[3] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.

[4] Zhang Y Q, Kong D D, Gan R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002—2017[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 165-182.

[5] Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(5): 1903-1925.

[6] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588. [Liu Changming, Zhang Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 579-588.]

[7] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于MOD16A2的锡林郭勒草原近14年的蒸散发时空动态[J]. 草地学报, 2016, 24(2): 286-293. [Zhang Qiaofeng, Liu Guixiang, Yu Hongbo, et al. Temporal and spatial dynamic of ET based on MOD16A2 in recent fourteen years in Xilingol Steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(2): 286-293.]

[8] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008. [Deng Xingyao, Liu Yang, Liu Zhihui, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994-3008.]

[9] 郑德凤, 詹诗瑶, 曹永强. 河北省潜在蒸散量与水分盈亏量时空动态特征分析[J]. 人民珠江, 2022, 43(3): 54-65. [Zheng Defeng, Zhan Shiyao, Cao Yongqiang. Analysis of spatiotemporal dynamic characteristics on potential evapotranspiration and water budget in Hebei Province[J]. Pearl River, 2022, 43(3): 54-65.]

[10] Pastorello G, Trotta C, Canfora E, et al. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-27.

[11] 朱炳海. 中国气候[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 147-150. [Zhu Binghai. Climate of China[M]. Beijing: Science Press, 1962: 147-150.]

[12] Miralles D G, Holmes T R H, De Jeu R A M, et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 453-469.

[13] Miralles D G, Van Den Berg M J, Gash J H, et al. El Niño-La Niña cycle and recent trends in continental evaporation[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(2): 122-126.

[14] Running S W, Mu Q Z, Zhao M S, et al. MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (MOD16A2/A3 and year-end gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (for collection 6)[M]. Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration, 2019: 1-37.

[15] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The shuttle radar topography mission[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(2): RG2004, doi: 10.1029/2005RG000183.

[16] 陈龙. 基于不同遥感数据估算全球陆地初级生产力与蒸散发的对比研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017. [Chen Long. Comparison of estimated global gross primary productivity and evapotranspiration based on different remote sensing data[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017.]

[17] 谢旭红, 武磊, 魏健美, 等. 三种蒸散发产品在西北内陆河上游山区的适用性比较[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(4): 437-446. [Xie Xuhong, Wu Lei, Wei Jianmei, et al. Applicability assessment of AET products in the alpine regions of northwestern China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2021, 57(4): 437-446.]

[18] 汪士为. 近20年内蒙古干旱时空动态及其对气候、蒸散发变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 231-239. [Wang Shiwei. Spatial and temporal dynamics of drought in Inner Mongolia in recent 20 years and its response to seasonal climate and evapotranspiration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 231-239.]

[19] 张鹏, 张圣微, 徐冉, 等. 基于遥感的科尔沁沙地蒸散发时空动态[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 399-405, 414-415. [Zhang Peng, Zhang Shengwei, Xu Ran, et al. Spatiotemporal dynamics of evapotranspiration in Horqin Sandy Land based on remote sensing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 399-405, 414-415.]

[20] 张翔, 朱晓昱, 沈贝贝, 等. 呼伦贝尔植被蒸散发时空变化研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(4): 308-316. [Zhang Xiang, Zhu Xiaoyu, Shen Beibei, et al. Analysis of temporal and spatial variation of vegetation evapotranspiration in Hulun Buir[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(4): 308-316.]

[21] Milich L, Weiss E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: Ground truth sampling of the Sahel along north-south transects[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(2): 235-260.

[22] 张钊, 陈宝瑞, 辛晓平. 1960—2015年呼伦贝尔草原气温和降水格局变化特征[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(12): 121-128. [Zhang Zhao, Chen Baorui, Xin Xiaoping. Variations of temperature and precipitation pattern in Hulunber grassland from 1960 to 2015[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(12): 121-128.]

[23] 谷佳贺, 薛华柱, 董国涛, 等. 黄河流域NDVI/土地利用对蒸散发时空变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 158-167. [Gu Jiahe, Xue Huazhu, Dong Guotao, et al. Effects of NDVI/land-use on spatiotemporal changes of evapotranspiration in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 158-167.]

[24] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981—2007: An earth observing satellite based analysis of trends and drivers[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 144-158.

[25] Jiapaer G, Liang S L, Yi Q X, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators, 2015, 58: 64-76.

[26] Zhang H F, Shu Y T, Yang O. Estimation of Hurst parameter by variance- time plots[C]//1997 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, PACRIM. 10 Years Networking the Pacific Rim, 1987—1997. Canada: IEEE, 1997, 2: 883-886.

[27] 陈耀亮. 干旱区内陆河流域土地利用/土地覆被变化及其对蒸散发的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. [Chen Yaoliang. Land-use and land-cover change and its impacts on evapotranspiration in inland river basin of arid region[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.]

[28] 詹明月. 基于模式数据的中国植被绿化对陆地蒸散发影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022. [Zhan Mingyue. Effects of vegetation greening on land evapotranspiration in China based on model data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022.]

[29] 杨晓慧, 于凤存. 巢湖芦苇湿地蒸散发量及其影响因素分析[J]. 治淮, 2022(4): 21-23. [Yang Xiaohui, Yu Fengcun. Analysis of evapotranspiration and its influencing factors in reed wetland of Chaohu Lake[J]. Harnessing the Huaihe River, 2022(4): 21-23.]

Temporal and spatial dynamic analysis of terrestrial evapotranspiration in China based on PML-V2 product

WEI Tao, WANG Yunquan

(School of Environmental Studies, China University of Geoscience(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Terrestrial evapotranspiration (ET) is an important process of land-atmosphere exchange and an important link in the global water migration and energy transfer system. Identifying the temporal and spatial dynamic characteristics of ET is of great significance in the study of regional water cycle and energy conversion. In this study, we compared the appropriateness of the three different ET products (GLEAM, MOD16, and PML-V2) in China using the flux data of nine tower stations in the country. We used the dataset of ET products between 2003 and 2020 to analyze the temporal and spatial dynamic characteristics of evapotranspiration in China. The results showed the following: (1) The ET products of PML-V2 is the most suitable for China. (2) On the time scale, ET gradually increased during the research period. On the spatial scale, ET exhibited an increasing tendency during 2003—2020 from northwest to southeast of China. (3) According to the Hurst index, the future ET of the whole nation is expected to show the opposite trend compared to the past. This means that ET increased in the past but is expected to decrease in the future. This study analyzed the spatiotemporal dynamic characteristics of ET in China, which could provide a reference for regional water resources utilization and optimal allocation.

Key words: evapotranspiration; appropriateness; dynamic characteristic; China